سال سی وسه، شمارهٔ دو، ۱٤۰۰(٤۱-٥٤)
DOI: 10.22067/jacsm.2022.74339.1078

بررسی عددی و تجربی خیز چندلایه‌های کامپوزیتی ناشی از ضربهٔ سقوط آزاد پرتابه‌های مختلف *

مقاله پژوهشی

محمدجواد رمضانی (۱) میثم محمدی (۲)

چکیده *در پژوهش حاضر اثر شکل پرتابه‌های مختلف بر پاسخ و خیز چندلایه‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه و کربن به‌روش تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته‌است. هشت نمونه از ورق‌های شش‌لایهٔ کامپوزیتی به ابعاد ۲۵×۲۵ سانتی‌متر با الیاف شیشه و کربن و رزین اپوکسی ۳۰۰۱ تحت تست ضربهٔ سرعت‌پایین قرار گرفته‌اند. هم‌چنین از پرتابه‌های کروی و نیمه‌کروی فولادی با جرم ۶۸۰ گرم و قطر ۵۵ میلی‌متر استفاده شده‌است. ارتفاع سقوط آزاد پرتابه‌ها ۱ و ۱/۵ متر در نظر گرفته شده‌است که منجر به ایجاد انرژی ضربه معادل ۶/۷ و ۱۰ ژول شده‌است. برای حل عددی از بستهٔ اجزای محدود ANSYS و LS-DYNA استفاده شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که بیشینهٔ خیز در مرکز ورق برای هر دو نمونهٔ کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه و کربن با پرتابهٔ کروی رخ می‌دهد. هم‌چنین مشاهده شد که خیز ورق‌های کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف شیشه و کربن در اثر برخورد پرتابهٔ نیمه‌کروی از ارتفاع ۱ متر به‌ترتیب ۳۴/۳٪ و ۱۸/۷٪ در مقایسه با برخورد پرتابهٔ کروی کاهش یافته‌است.*

واژه‌های کلیدی ضربهٔ سرعت‌پایین، خیز ورق، کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه، کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن، حل عددی.

مقدمه

در بسیاری از کشورهای صنعتی و نیز کشورهای در حال توسعه، نقش کامپوزیت‌ها در گسترش صنایع آن کشور بسیار مهم و انکارناپذیر است. برخی از مزایای کامپوزیت‌ها شامل نسبت بالای استحکام به وزن، وزن کم، خواص استحکامی بالا و مقاومت خوب در برابر سایش است. هم‌چنین برخی از معایب کامپوزیت‌ها نسبت‌به فلزات مقاومت کم در برابر گرما، قیمت بالا و ضعف در برابر بارهای ضربه‌ای می‌باشد که این ضعف منجر به تغییر شکل زیاد و آسیب‌های بین لایه‌های کامپوزیت می‌شود. آزمایش سقوط آزاد وزنه روشی برای بررسی آسیب سازه‌ها و قطعات مکانیکی می‌باشد است هرچند در برخوردهای کم‌انرژی، اثرات ضربه معمولاً قابل مشاهده نیست. در این روش خسارت‌های ناشی از ضربهٔ سرعت‌پایین ناچیز است به‌طوری‌که منجر به لایه‌لایه‌شدگی و آسیب‌هایی از قبیل شکست لایه‌ها و الیاف می‌شود. مدل‌سازی رفتار و پیش‌بینی آسیب در چندکامپوزیت‌های چندلایه در اثر ضربهٔ سرعت‌پایین برای تحلیل و طراحی سازه‌های کامپوزیتی ضروری است. بررسی ورق‌های کامپوزیتی تقویت‌شده تحت بارگذاری‌های متفاوت، توسط پژوهشگران مختلف مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌است. احمد و همکاران [1] به تجزیه و تحلیل المان محدود برای ارزیابی پاسخ ضربهٔ سرعت‌پایین ورق‌های کامپوزیتی کربن/ اپوکسی هشت‌لایه پرداختند. مدل‌سازی ورق‌ها توسط نرم‌افزار LS-DYNA و از روش الاستیک خطی مواد براساس

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۰/۱۰/۳ و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۰/۱۰/۲۷ می‌باشد.
(۱) کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان.
(۲) نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان.
Email: meisam.mohammadi@vru.ac.ir

معیارهای شکست انجام شد. هم‌چنین در روش تجربی از شرایط مرزی بسته و انرژی ضربهٔ ۲۳/۶۲ ژول استفاده کردند.

داور و همکاران [2] به بررسی تجربی و عددی ضربهٔ سرعت‌پایین بر روی پانل ساندویچی با هستهٔ مشبک پرداخته‌اند. آن‌ها با بررسی سطح آسیب‌دیده قطعه نتیجه گرفتند که صلبیت بیشتر محل برخورد پرتابه منجر به کاهش سطح آسیب قابل مشاهده در سازه می‌شود. صیفوری و همکارش [3] به بررسی تحلیلی و عددی صفحات کامپوزیتی تحت بارگذاری ضربه‌ای سرعت‌پایین با پرتابه‌های متفاوت در حالت لایه‌لایه‌شدگی و بدون لایه‌لایه‌شدگی پرداختند. برای مدل‌سازی در روش تحلیلی و عددی به‌ترتیب از مدل جرم و فنر و هم‌چنین از نرم‌افزار انسیس استفاده کرده‌اند. پرتابه‌های به‌صورت تخت و مخروطی و کروی به جرم ۳ گرم مدل‌سازی شد. نتایج حاکی از آن است که بیشینه خیز در مرکز ورق با ضخامت یکسان برای پرتابهٔ تخت در مقایسه با دیگرپرتابه‌ها کمتر است و هر اندازه که ضخامت نمونه کمتر باشد میزان خیز در اثر برخورد افزایش می‌یابد.

قیومی و همکاران [4] بررسی آسیب بر پایهٔ روش نشـــر آوایی در چندلایه‌های کامپوزیتی تک‌جهته تحت آزمایش ضـــربهٔ ســـرعت‌پایین را مطالعه کردند. یکی از معضلات آزمایش ضربهٔ سرعت‌پایین، آسیب‌های ناشی از این ضـــربات می‌باشـــد که ممکن اســـت با بازرســـی چ شمی قابل ت شخیص نبا شد و هم‌چنین منجر به افت شدید در ا ستحکام سازه شود، به همین دلیل از روشی نو برمبنای آزمون غیرمخرب نشـــرآوایی برای ارزیابی نمونه‌ها ناشی از ضربه استفاده کردند.

یالکین و همکاران [5] رفتار ورق‌های GFRP تحت ضربهٔ سرعت‌پایین با دو انرژی ضربهٔ ۱۰ و ۶۰ ژول با الیاف E-Glass با زاویهٔ چیدمان $[\pm45/(0/90)_2]_S$ را به‌صورت تجربی و عددی مطالعه کردند و مشاهده کردند که مقادیر نیروی تماس، میزان خیز و زمان تماس به سرعت ضربه بستگی دارد، در نتیجه انرژی جذب‌شده، نیروی تماس، میزان خیز مرکز ورق و زمان تماس نمونه تا نفوذ پرتابه به نمونه افزایش می‌یابد.

شتی و همکاران [6] اثر ضربهٔ سرعت‌پایین بر روی کامپوزیت‌های GFRP و هیبریدی را مطالعه کردند. ابعاد نمونه‌های مورد نظر cm ۱۰× ۱۰و هم‌چنین به‌منظور اجتناب از اثر کمانش عرضی، یک طرح [0/90] برای ساخت ورق‌ها اتخاذ کردند. شرایط آزمایشگاهی برای انجام تست ضربه را در سه ارتفاع ۰/۵، ۰/۷، و ۰/۹ متر را با شرایط مرزی گیردار تنظیم کردند و هم‌چنین نتایج آزمون‌ها نشان داد که ناحیهٔ آسیب‌دیده در ورق‌های هیبریدی در مقایسه با ورق‌های GFRP بسیار بزرگ‌تر و حداکثر انرژی جذب‌شده توسط لایه‌های هیبریدی نیز در مقایسه با ورق‌های GFRP بیشتر است. عامری و همکاران [7] اثر جرم پرتابه بر رفتار چندلایه‌های GFRP بااستفاده از ضربهٔ سرعت‌پایین را مورد مطالعه قرار دادند. سطح آسیب ناشی از ضربه با افزایش انرژی اولیه تا جایی که پرتابه، نمونه را سوراخ کند، افزایش یافته و باعث خرابی‌های متعددی، از جمله ترک‌خوردگی ماتریس، لایه‌لایه‌شدگی و شکستگی الیاف شده‌است.

صیفوری و همکاران [8] به بررسی آسیب ناشی از ضربهٔ سرعت‌پایین در ورق‌های کامپوزیتی منحنی‌دار CFRP و GFRP پرداختند. آن‌ها در بخش اول، بیشترین مقدار خیز نقطه میانی کامپوزیت منحنی‌دار با سه پرتابهٔ کروی، استوانه‌ای و مخروطی با وزن ۶۸۰ گرم استفاده کردند و بخش دوم شدت آسیب ناشی از ضربه را با استفاده از آسیب ترموگرافی تحت تأثیر سرعت کم پرتابه بررسی کردند. نتایج حاصل نشان داد که پرتابهٔ استوانه‌ای آسیب اساسی به ورق کامپوزیت منحنی وارد نکردند، درحالی‌که در پرتابهٔ مخروطی و کروی آسیب زیادی وارد نمونه‌ها شده‌است. علاوه‌بر این، مساحت ناحیهٔ آسیب‌دیدهٔ ناشی از پرتابهٔ مخروطی به‌مراتب بیشتر از سایر پرتابه‌ها بوده‌است.

اژدری و همکاران [9] به بررسی تجربی و عددی ضربهٔ سرعت‌پایین بر روی نمونه‌های گلار پراختند. در قسمت تجربی، ضربهٔ سرعت‌پایین در چهار سطح انرژی

۸، ۱۱/۵، ۱۵ و ۱۸/۵ ژول بر روی ورق‌های GLARE انجام شده‌است. با توجه به نتایج آزمایش مشاهده شد که با افزایش انرژی ضربه، بیشینه خیز در مرکز ورق افزایش می‌یابد. مگری و همکارش [10] به بررسی رفتار ضربهٔ سرعت‌پایین بر روی کامپوزیت‌های الیاف–فلز پرداختند. نمونه‌های مورد استفادهٔ آن‌ها برای شبیه‌سازی فیبر/فلزی با الیاف شیشه و فیبر/فلز با فیبر ترکیبی (کربن+شیشه) بود. مدل جانسون کوک برای مدل‌سازی پلاستیسیته و آسیب لایهٔ آلومینیوم و معیارهای آسیب Hashin برای لایه‌های FRP استفاده شد. حسینی و همکاران [11] به شبیه‌سازی عددی ضربهٔ سرعت‌پایین ورق کامپوزیتی مستطیلی تقویت‌شده با نوارهای آلیاژ حافظه‌دار پرداختند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که خاصیت سوپر الاستیسیتهٔ آلیاژ حافظه‌دار باعث می‌شود که این آلیاژ در حین ضربه انرژی زیادی را جذب کند که این امر باعث بهبود مقاومت به ضربهٔ ورق کامپوزیتی و کاهش آسیب ناشی از ضربه می‌گردد. برای شناخت کامل رفتار ورق‌های کامپوزیتی در برابر بارهای دینامیکی از جمله بارهای ضربه‌ای لازم است که پاسخ آن‌ها در برابر ضربه‌زننده‌های متفاوت بررسی شود. در پژوهش حاضر، هدف اصلی مقایسهٔ نتایج تجربی و عددی و هم‌چنین بررسی اثر نوک دماغهٔ پرتابهٔ کروی و نیمه‌کروی بر روی ورق‌های کامپوزیتی کربن و شیشه با ابعاد و تعداد لایه‌های یکسان توسط ضربهٔ سرعت‌پایین است و هم‌چنین بیشینه خیز مرکز نمونه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

آزمایش تجربی

ساخت کامپوزیت

در این تحقیق از الیاف کربن QUANTOM Wrap 300 C و الیاف شیشه QUANTOM Wrap 200 G و هم‌چنین رزین‌های اپوکسی QUANTOM EPR 3001 تولید شرکت رادیاب استفاده شده‌است. ساخت کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن و شیشه از روش دستی (hand lay-up) بوده‌است. برای ساخت هشت نمونه ورق‌های کامپوزیتی شش‌لایه، ابتدا ورق‌های متعامد شیشه و کربن به طول و عرض ۲۵ سانتی‌متر برش زده می‌شود. لازم به ذکر است که الیاف شیشه و کربن مورد استفاده در شکل (۱) دارای مش‌بندی متوسط و ضخامت هر لایه به‌ترتیب به‌اندازهٔ ۰/۱۲ و ۰/۲ میلی‌متر است.



شکل ۱ الیاف شیشه و کربن

رزین نسبت سه به یک به هاردنر (Hardner) اضافه شده و به مدت ۵ دقیقه توسط هم‌زن با دور ثابت به‌صورت یک‌نواخت مخلوط می‌شود. از جمله ویژگی‌های رزین و هاردنر مورد استفاده قدرت بالای چسبندگی خواص و مکانیکی بسیار بالایی مانند استحکام کششی، مقاومت برشی، مقاومت شیمیایی عالی، مقاوم در برابر اسید و شوک، استفادهٔ آسان و بوی کم و خواص رطوبتی خوب می‌باشد و چگالی رزین در دمای ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد ۱/۱۵ kg/m^3 می‌باشد.

بعد از آماده‌سازی رزین اپوکسی لایه‌های برش‌خورده را روی میز کار قرار می‌گیرد و طبق شکل (۲) سطح لایه‌های شیشه و کربن آغشته به رزین می‌شود و لایه به لایه با دقت روی همدیگر قرار می‌گیرند. در نهایت شش لایه الیاف شیشه/اپوکسی و کربن/اپوکسی درون قالب فلزی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که برای جلوگیری از چسبیدن قالب فلزی به لایه‌های کامپوزیتی، سطح داخلی قالب فلزی آغشته به گریس می‌شود. نمونه‌های آماده‌شده به‌مدت ٤٨ ساعت تحت دستگاه پرس کامپوزیت برای خارج شدن رزین‌های اضافی و از بین رفتن حفره‌های موجود بین لایه‌ها قرار می‌گیرند. در شکل (۳) نمونهٔ تقویت‌شده با الیاف شیشه

و کربن نشان داده شده‌است.



شکل ۲ لایه‌های آغشته به رزین



(الف) الیاف کربن

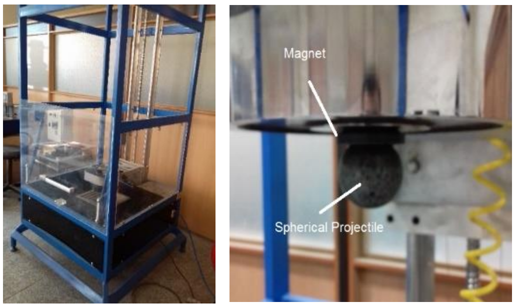


(ب) الیاف شیشه

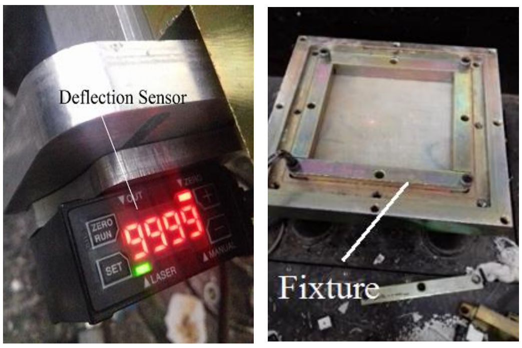
شکل ۳ نمونه ورق کامپوزیتی

آزمون ضربۀ سرعت‌پایین

آزمون ضربه توسط دستگاه تست سقوط وزنه که در شکل (٤) نشان داده شده‌است در آزمایشگاه کامپوزیت دانشگاه ولی‌عصر رفسنجان انجام گردید. این دستگاه دارای سنسور حساس و بسیار دقیق جابه‌جایی می‌باشد. سنسور جابه‌جایی در شکل (٥) این امکان را دارد که ۸۰۰ داده در هنگام برخورد از نقطۀ میانی ورق را ذخیره کند. این دستگاه دارای فیکسچر در شرایط مرزی کاملاً گیردار برای ورق‌های مختلف می‌باشد. برای آزمایش سقوط وزنه، این دستگاه در دو ارتفاع ۱ و ۱/٥ متر با انرژی ضربه‌زنندۀ ٦/٧ ژول و ۱۰ ژول تنظیم شد. قبل شروع آزمایش سقوط پرتابه ابتدا سنسور جابه‌جایی‌سنج کالیبره شده و پرتابه‌های کروی و نیمه‌کروی توسط یک آهن‌ربای برقی با فعال کردن گزینۀ مگنت نگه داشته می‌شود و پس از رهاسازی پرتابه و اصابت به مرکز هدف، میزان بیشینه جابه‌جایی مرکز ورق به‌طور خودکار ذخیره می‌شود.



شکل ٤ دستگاه تست سقوط وزنه



شکل ٥ سنسور جابه‌جایی و فیکسچر

برای بررسی پاسخ دینامیکی ورق کامپوزیتی از خیزسنج استفاده می‌شود، خیز سنج با تابیدن نور لیزر به سطح کامپوزیت، میزان خیز سطح مورد نظر را به‌صورت دیجیتال برروی صفحۀ خود نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل (٦) نشان داده شده‌است، در آزمون سقوط آزاد وزنه از دو پرتابۀ کروی و نیمه‌کروی فولادی با جرم ٦٨۰ گرم و شعاع 55 mm از دو ارتفاع ۱ و ۱/٥ متر با انرژی ضربۀ ٦/٧ ژول و۱۰ ژول استفاده

شده‌است.



شکل ٦ پرتابه‌های کروی و نیمه‌کروی

شبیه‌سازی عددی

مدل پرتابه و هدف، شامل دو ضربه‌زننده کروی و نیمه‌کروی بر روی ورق‌هایی به ابعاد ۲۵۰ × ۲۵۰ میلی‌متر و ضخامت‌ها ۱/۹ و ۳/۸ میلی‌متر به‌ترتیب برای شیشه/اپوکسی و کربن/ اپوکسی با چیدمان $[0/90/0]_s$ می‌باشد. برای شبیه‌سازی تحلیل رفتار صفحات کامپوزیتی با پرتابه‌های مختلف در برابر ضربهٔ سرعت‌پایین با شرایط مرزی گیره‌دار از نرم‌افزار ANSYS استفاده شده‌است. خواص صفحات ارتوتروپیک در شبیه‌سازی مدل پرتابه و هدف، در جدول (۱) و همچنین خواص ایزوتروپیک پرتابهٔ فولادی در جدول (۲) آمده‌است. برای شبیه‌سازی تحلیل رفتار صفحات کامپوزیتی با پرتابه‌های مختلف در برابر ضربه از مش‌های منظم و یک‌دست با سایز ۲۰۰ المان (Quad, Mapped) استفاده شده‌است.

لازم به ذکر است برای حالتی که آسیب ایجاد می‌شود هدف به‌صورت چندلایه با خواص یکسان و برای مدل بدون آسیب نمونه‌ها به‌صورت یک‌لایه مدل‌سازی شده‌است. برای جلوگیری از جدا شدن لایه‌ها در هنگام ضربه از تماس سطح‌به‌سطح استفاده شده‌است، به عبارت دیگر اگر تنش برشی یا نرمال بین لایه‌ها از استحکام‌های نرمال یا برشی بیشتر شود اتصال بین لایه‌ای تخریب می‌گردد. هنگام تعریف تماس سطح به سطح، مقادیر استحکام کششی و برشی بین لایه‌ای اتصال باید در نظر گرفته شود، که این مقادیر براساس خواص مکانیکی بین لایه‌ای کامپوزیت شیشه برابر است با $\sigma_n = 9\text{MPa}$ و $\tau_\upsilon = 20\text{MPa}$ و برای کامپوزیت کربن $\sigma_n = 30\text{MPa}$ و $\tau_\upsilon = 100\text{MPa}$ می‌باشد و همچنین سرعت برخورد دو پرتابه به مرکز ورق ٤/٤٢ و ٥/٤٢ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده‌است.

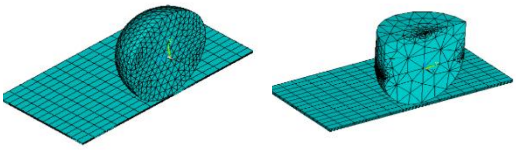
در شبیه‌سازی از مدل یک دوم برای به‌دست آوردن نتایج استفاده شده‌است، با این دلیل که سبب کاهش زمان حل در مدل می‌شود. در شکل (۷) مدل‌سازی پرتابهٔ کروی و نیمه‌کروی نشان داده شده‌است.

جدول ۱ خواص ماده ورق کامپوزیتی و پرتابهٔ فولادی

کامپوزیت با الیاف شیشه	کامپوزیت با الیاف کربن	خواص
٣٦	٥٦	$E_x = E_y(\text{GPa})$
١٠	٧/٦	$E_z(\text{GPa})$
٠/٢٥	٠/٢٥	$\upsilon_{xy} = \upsilon_{zx} = \upsilon_{yz}$
٤/٥	٢/٦	$G_x = G_y = G_z(\text{GPa})$
١٦٠٠	١٨٠٠	$\rho(\text{kg/m}^3)$

جدول ۲ خواص پرتابهٔ فولادی

٢٠٠	$E_x(\text{GPa})$
٠/٣	Υ
٦٨٠	Mass (g)
٧٨٦٠	$\rho(\text{kg/m}^3)$



شکل ۷ مدل‌سازی پرتابه‌های کروی و نیمه‌کروی

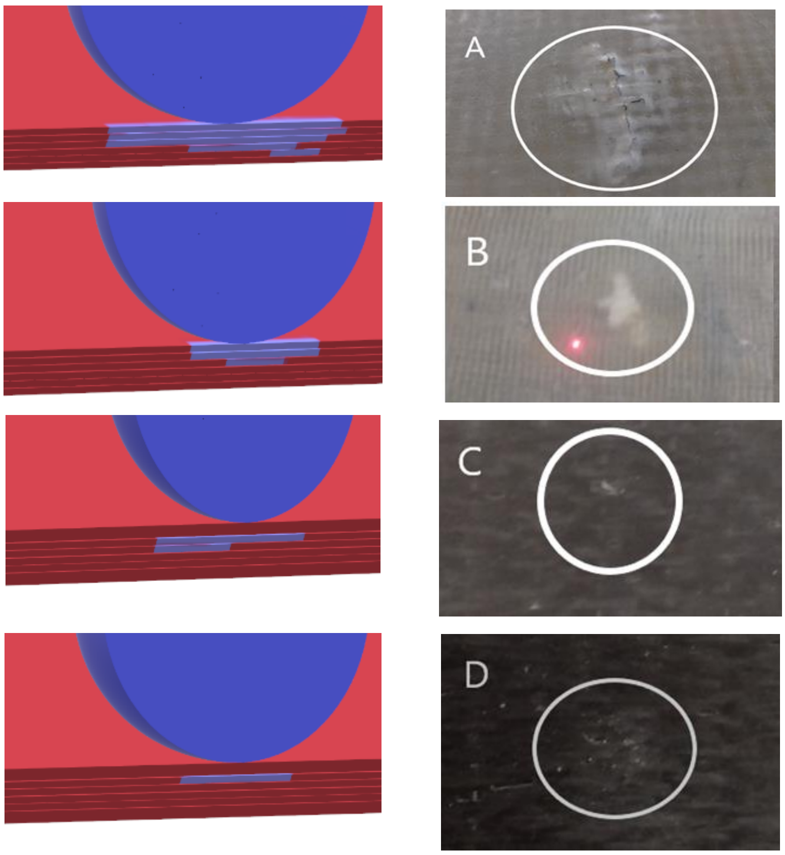
نتایج

در این بخش نتایج تجربی و عددی ورق‌های کامپوزیتی

کربن/اپوکسی و شیشه/ اپوکسی به ابعاد ۲۵ × ۲۵ سانتی-متر و ٦ لایه با چیدمان$[0/90/0]_s$ که به‌ترتیب دارای ضخامت ۳/۸ و ۱/۹ میلی‌متر است، مورد نقد و بررسی قرار می‌گیرند. ابتدا به بررسی چشمی آسیب وارد شده به سطح نمونه‌ها پس از اعمال ضربه پرداخته شده و سپس نتایج حاصل از روش تجربی، با نتایج حل عددی مقایسه شده‌است.

بررسی اولیه از سطح شکست نمونه‌ها نشان می-دهد که پرتابهٔ کروی نسبت به پرتابهٔ نیمه‌کروی آسیب بیشتری به نمونه‌ها وارد کرده‌است، به‌طوری‌که منجر به آسیب جدی و شکست در لایه‌های بالایی و هم‌چنین لایه‌لایه‌شدگی در نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه شده‌است به‌طوری‌که در شبیه‌سازی ناحیهٔ آسیب، لایه-های زیادی را تحت تأثیر آسیب‌دیدگی قرار داده‌است و هم‌چنین میزان مقاومت در برابر ضربه بیشتر در ورق کربن/اپوکسی باعث شد که از میزان لایه‌لایه‌شدگی و آسیب جدی به نمونه کاسته شود. شکل (۸) میزان آسیب و لایه‌لایه‌شدگی در حالت تجربی و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

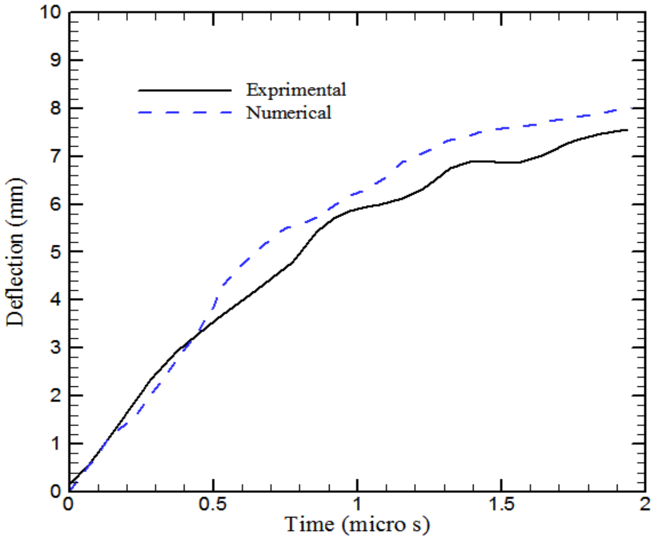
پرتابهٔ کروی به‌دلیل هندسه و سطح تماس بیشتر منجر به افزایش آسیب در نمونه شده‌است؛ به‌طوری‌که در ارتفاع ۱/۵ متری پرتابهٔ کروی باعث شکست الیاف‌ها و جدایش بین لایه‌ها شده‌است.



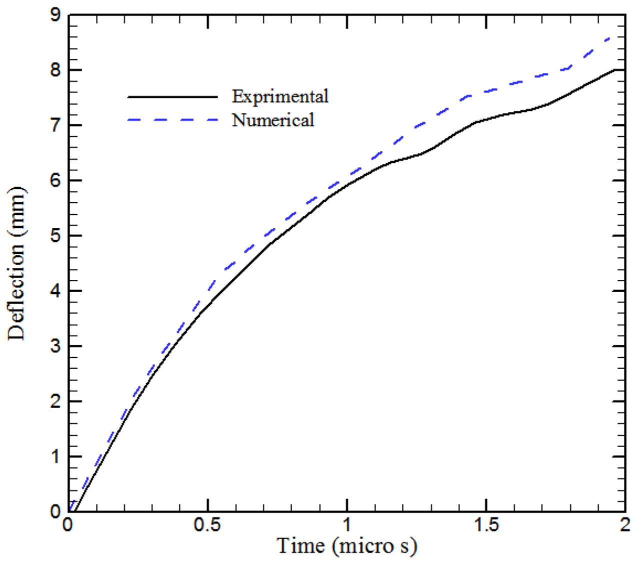
شکل ۸ بررسی میزان آسیب نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه و کربن در ارتفاع ۱/۵ متری با استفاده از پرتابهٔ کروی (A,C) و پرتابهٔ نیمه‌کروی (B,D)

در نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف کربن به‌دلیل ضخامت بیشتر و هم‌چنین مقاومت و استحکام مطلوب‌تر نسبت‌به بارهای ضربه‌ای و دینامیکی میزان آسیب بسیار کمتر از نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه بوده‌است؛ به‌طوری‌که سطح نمونه پس از ضربه دچار آسیب و سایش موضعی بین لایه‌های بالایی شده‌است.

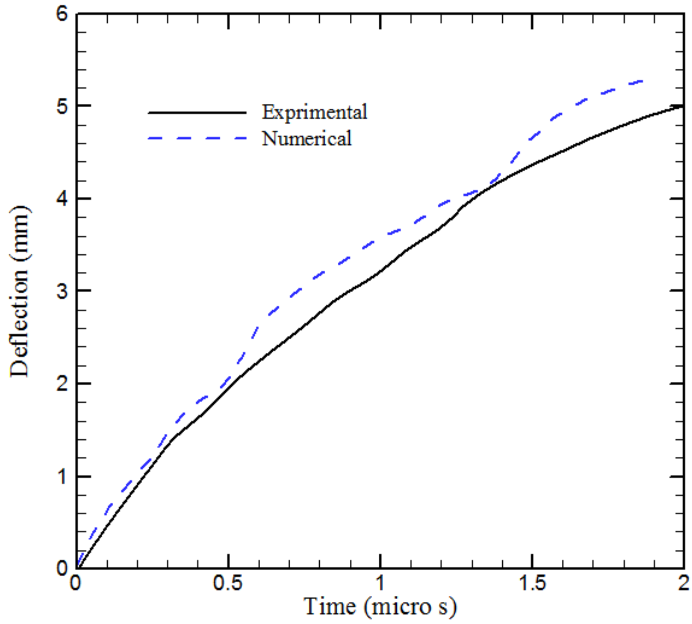
در شکل (۹) و (۱۱) بیشترین جابه‌جایی در مرکز ورق تقویت‌شده با الیاف شیشه به‌ترتیب با مقدار ۷/۵۸ و ۴/۹۸ میلی‌متر توسط پرتابهٔ کروی و نیمه‌کروی با انرژی ضربه زنندهٔ ۶/۷ ژول به‌دست آمده‌است. همان‌طور مشاهده می‌شود مقدار جابه‌جایی ٪ ۳۳/۴ کاهش یافته‌است.



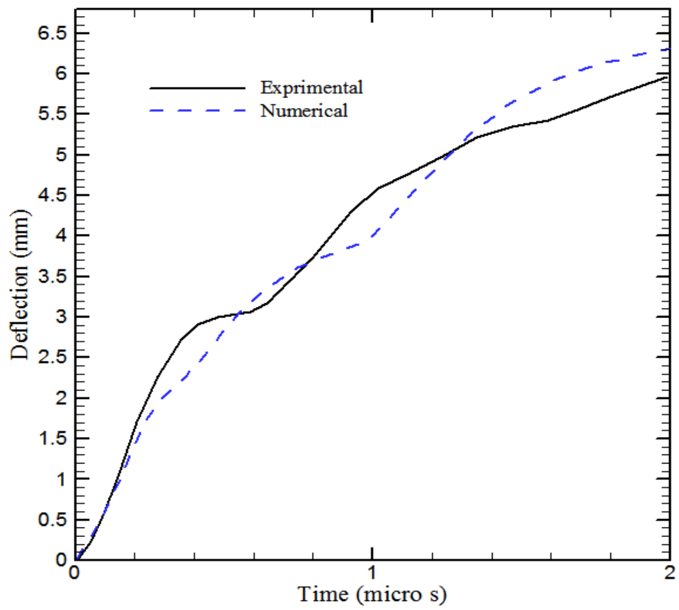
شکل ۹ نمودار بیشترین جابه‌جایی مرکز ورق شیشه/اپوکسی با پرتابهٔ کروی در ارتفاع ۱ متر (خط، روش تجربی و خط‌چین روش عددی)



شکل ۱۰ نمودار بیشترین جابه‌جایی در مرکز ورق شیشه/اپوکسی با پرتابهٔ کروی در ارتفاع ۱/۵متر
(خط، روش تجربی و خط‌چین روش عددی)



شکل ۱۱ نمودار بیشترین جابه‌جایی مرکز ورق شیشه/اپوکسی با پرتابه نیمه‌کروی در ارتفاع ۱ متر
(خط، روش تجربی و خط‌چین روش عددی)

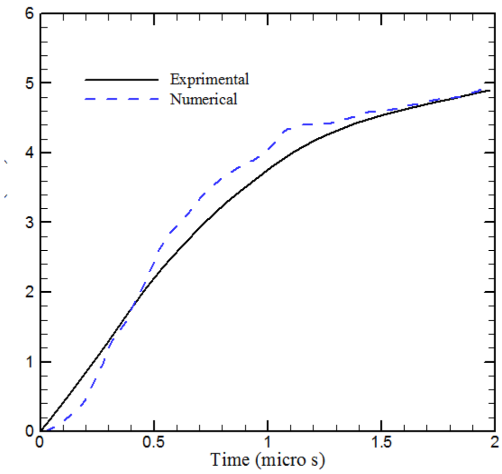


شکل ۱۲ نمودار بیشترین جابه¬جایی مرکز ورق شیشه/اپوکسی با پرتابهٔ نیمه‌کروی در ارتفاع ۱/۵ متری
(خط، روش تجربی و خط‌چین روش عددی)

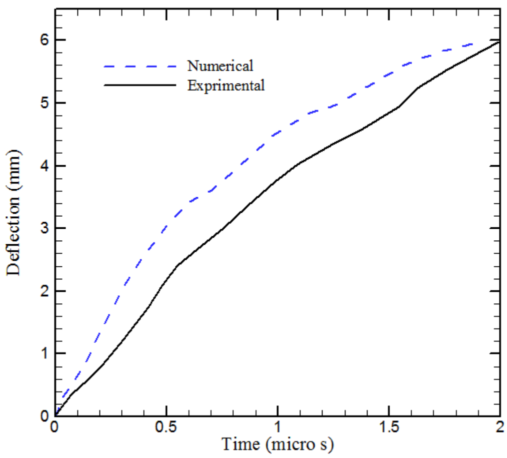
در مقایسه شکل (۱۰) و (۱۲) با افزایش ارتفاع و هم‌چنین انرژی ضربه‌زنندهٔ ۱۰ ژول، مقدار خیز در مرکز ورق تقویت‌شده با الیاف شیشه افزایش می‌یابد به‌طوری- که با استفاده از پرتابهٔ کروی مقدار جابه‌جایی ٪ ۳٤/۱۷

نسبت‌به پرتابهٔ نیمه‌کروی افزایش پیدا کرده‌است.

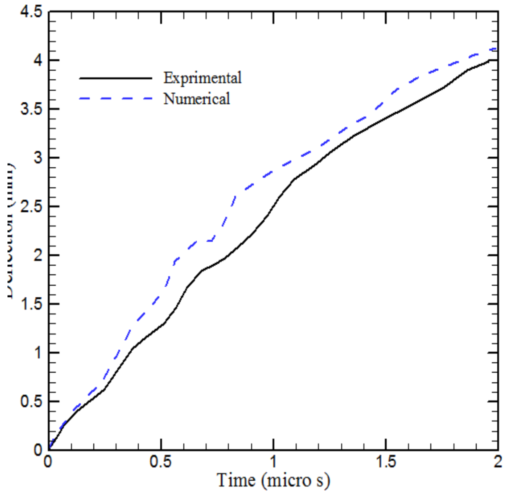
در شکل (۱۳) و (۱۵) بیشترین جابه‌جایی در مرکز ورق تقویت‌شده با الیاف کربن به‌ترتیب با مقدار ٤/٨٤ و ۳/۹۹ میلی‌متر توسط پرتابهٔ کروی و نیمه‌کروی با انرژی ضربه‌زنندهٔ ٦/٧ ژول به‌دست آمده‌است. مقدار خیز به‌دست‌آمده توسط پرتابهٔ کروی به‌دلیل شکل هندسی خود، ٪ ۲۱/۳ نسبت‌به پرتابهٔ نیمه‌کروی افزایش پیدا کرده‌است.



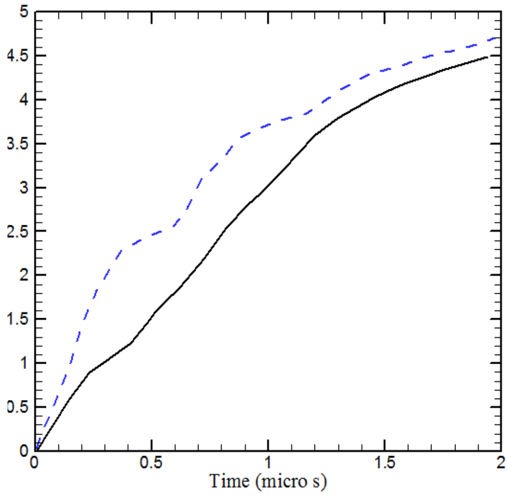
شکل ۱۳ نمودار بیشترین جابه‌جایی مرکز ورق کربن/اپوکسی با پرتابهٔ کروی در ارتفاع ۱ متر (خط، روش تجربی و خط‌چین روش عددی)



شکل ١٤ نمودار بیشترین جابه‌جایی مرکز ورق کربن/اپوکسی با پرتابهٔ کروی در ارتفاع ۱/۵ متر (خط، روش تجربی و خط‌چین روش عددی)

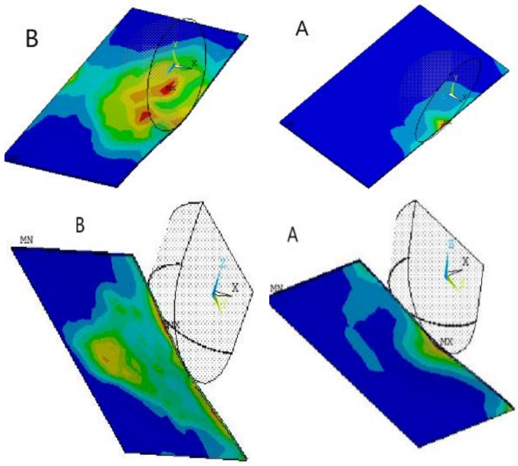


شکل ۱۵ نمودار بیشترین جابه‌جایی مرکز ورق کربن/اپوکسی با پرتابهٔ نیمه‌کروی در ارتفاع ۱ متر (خط، روش تجربی و خط‌چین روش عددی)

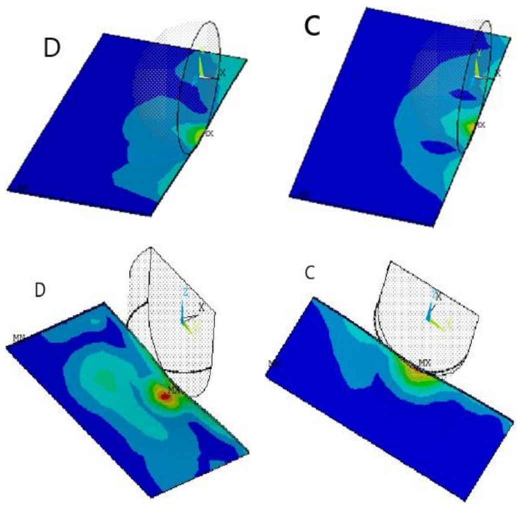


شکل ١٦ نمودار بیشترین جابه‌جایی مرکز ورق کربن/اپوکسی با پرتابهٔ نیمه‌کروی در ارتفاع ۱/۵ متر (خط، روش تجربی و خط‌چین روش عددی)

هم‌چنین با مقایسهٔ شکل (١٤) و (١٦) می‌توان مشاهده کرد که مقدار خیز مرکز ورق کامپوزیتی CFRP تو سط پرتابهٔ نیمه‌کروی در شکل ١٦، ٪۲۵ کاهش پیدا کرده‌است. علاوه‌بر این هر ۸ نمونه ورق کامپوزیتی از ٦ لایه و با ابعاد یکسان ساخته شده‌اند.



شکل ۱۷ توزیع بیشترین تنش وارد شده در ارتفاع ۱ (A) و ۱/۵ متر (B) نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه توسط پرتابۀ کروی و نیمه‌کروی



شکل ۱۸ توزیع ماکزیمم تنش وارد شده در ارتفاع ۱ (C) و ۱/۵ متر (D) نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف کربن توسط پرتابۀ کروی و نیمه‌کروی

در نتیجه در مقایسۀ ورق‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه و کربن در ارتفاع ۱ متری توسط پرتابۀ کروی و نیمه‌کروی با یکدیگر، مقدار خیز به دست‌آمده در مرکز ورق به‌ترتیب ٪ ٣٦,١٤ و ٪ ١٩,٨٧ کاهش پیدا کرده‌است و در ارتفاع ۱/۵ متری با انرژی ضربه زنندۀ ۱۰ ژول توسط پرتابۀ کروی و نیمه‌کروی مقدار جابه‌جایی به‌دست‌آمده به‌ترتیب٪ ۲۵/۱ و ٢٤٪.٦٢٪ کاهش پیدا کرده‌است. هم‌چنین در مقایسۀ حل تجربی و عددی دارای هم‌گرایی و تطابق خوبی نسبت‌به یکدیگر بودند.

در شکل (۱۷) و (۱۸) مربوط به توزیع تنش برای نمونه‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه و کربن برای پرتابه‌های کروی و نیمه‌کروی تحت ضربه نشان داده شدها ست. همان‌طور که برا ساس هند سۀ تغییر شکل نمونه‌ها انتظار می‌رفت، سطح میانی نمونه‌ها با افزایش ارتفاع دارای بیشترین تغییر شکل و تنش می‌باشد؛ به‌طوری‌که بیشترین میزان آسیب الیاف و ماتریس در این ناحیه می‌باشد.

علاوه بر نتایج گرافیکی ارائه شده، در جدول ۳، مقادیر عددی خیز بیشینۀ ورق‌های تقویت شده با الیاف کربن و شیشه برای پرتابه‌های مختلف تحت انرژی‌های متفاوت نشان داده شده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی بیشترین مقدار خیز در مرکز ورق به‌صورت تجربی و عددی با استفاده از ضربۀ سرعت‌پایین بر روی نمونه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه و کربن با پرتابۀ کروی و نیمه‌کروی در ارتفاع ۱ و ۱/۵ متر پرداخته شده‌است. نمونه‌های مورد استفاده دارای ابعاد و تعداد لایه‌های یکسان است، به‌طوری‌که اندازۀ نمونه‌ها ۲۵×۲۵ سانتی‌متر و شش‌لایه می‌باشند و هم‌چنین وزن پرتابه‌های مورد استفاده ٦٨٠ گرم می‌باشد.

۱. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که نمونه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن استحکام و مقاومت بالاتری در برابر ضربه نسبت‌به کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف شیشه دارد.
۲. ا ستفاده از نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن باعث کاهش مقدار خیز و تغییر شکل و آسیب در مرکز ورق شده‌است؛ به‌طوریکه در ارتفاع ۱/۵ متر برای پر تا بۀ کروی و نیمه‌کروی حدود ٪ ۲۵ کاهش یافته‌است.

جدول ۳ بیشترین جابه‌جایی مرکز ورق‌های کامپوزیتی CFRP و GFRP

ورق کامپوزیتی تقویت‌شده با	ضخامت (mm)	پرتابه	انرژی ضربه (J)	ارتفاع (m)	حل تجربی (mm)	حل عددی (mm)
الیاف کربن	۳/۸	کروی	٦/٧	۱	٤/٨٤	٤/٩٧
الیاف کربن	۳/۸	کروی	۱۰	۱/۵	۵/۹۸	٦/۰۱
الیاف کربن	۳/۸	نیمه‌کروی	٦/٧	۱	۳/۹۹	٤/۲۲
الیاف کربن	۳/۸	نیمه‌کروی	۱۰	۱/۵	٤/۵	٤/٦٩
الیاف شیشه	۱/۹	کروی	٦/٧	۱	٧/۵۸	۸
الیاف شیشه	۱/۹	کروی	۱۰	۱/۵	۸/۰۲	۸/٦۱
الیاف شیشه	۱/۹	نیمه‌کروی	٦/٧	۱	٤/۹۸	۵/۳٦
الیاف شیشه	۱/۹	نیمه‌کروی	۱۰	۱/۵	۵/۹٦	٦/٦۱

۳. مقدار خیز در مرکز ورق از آزمایش‌های تجربی در نمونه‌های تقویت‌شـــده با الیاف کربن در ارتفاع ۱ و ۱/۵ متر در پرتابهٔ نیمه‌کروی نســـبت به پرتابهٔ نیمـه‌کروی بـه‌ترتیـب ٪ ۱٧/۵ و ٪ ۲٤/٧ کـاهش یافته‌است.

٤. پرتابهٔ کروی بیشترین میزان خیز در مرکز ورق در نمونه‌ها را داشته‌است و هم‌چنین با افزایش ارتفاع و انرژی ضربه‌زننده، مقدار جابه‌جایی افزایش پیدا کرده‌است.

۵. تطابق و هم‌گرایی خوبی میان حل تجربی و عددی وجود دارد و هم‌چنین مقدار درصد کمی خطا بین حل تجربی و عددی وجود دارد که به‌دلیل شرایط آزمایشگاهی و هم‌چنین وجود حفره‌ها درون نمونه می‌باشد.

٦. میزان لایه‌لایه‌شدگی و آسیب در نمونه‌های شیشه/ اپوکسی به‌مراتب بیشتر از نمونهٔ کربن/ اپوکسی می‌باشد.

واژه نامه

چندلایه	Laminate
کامپوزیت	Composite
سقوط آزاد	Drop weight
ضربه	Impact
پرتابه	Projectile
خیز	Deflection
روش تجربی	Experimental method
شبیه سازی عددی	Numerical simulation
نرم‌افزار انسیس	Ansys software
ضربه سرعت‌پایین	Low velocity impact

مراجع

1. Ahmad, F., Abbassi, F., Park, M. K., Jung, J. W., and Hong, J. W., "Finite Element Analysis for the Evaluation of the Low-Velocity Impact Response of a Composite Plate", *Advanced Composite Materials,* (2018).
2. Davar, A., Azarafza, R., and Faraji, J., "Experimental and Numerical Analysis of Low-Velocity Impact

on Composite Sandwich Panels with Grid Stiffened Core", *Journal of Science and Technology Composite*, Vol. 6, Pp. 615-626, (in Persian) , (2020).

3. Seifoori, S., and M., "Analytical And Numerical Study Of Composite Plates Under Impact Loading At Low Velocity With Different Strikers", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, Pp. 53-60, (in Persian), (2018).
4. Ghayoomi Mohammadi, M. M. A., Yousefi, A., Ahmadi, J., and Najafabadi, M., "AE- Based Damage Investigation in Composite Laminates under Low-Velocity Impact Tests", *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, Pp. 91-100, (in Persian) , (2017).
5. Yalkın, H. E., Karakuzu, R., and Alpyıldız, T., "Experimental and Numerical Behaviors of GFRP Laminates under Low Velocity Impact", *Journal of Composite Materials*, Vol. 54, Pp.2999-3007, (2020).
6. Shetty, H., Sethuram, D., Rammohan, B., and Budarapu, P. R., "Low-Velocity Impact Studies on GFRP and Hybrid Composite Structures", *International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics*, Vol. 12, Pp.125-141, (2020.)
7. Li, Z., Ameri, A. A., Hazell, P. J., Khennane, A., Escobedo-Diaz, J. P., Aryal, B., and Wang, H., "Effects of Impactor Mass on the Low-Velocity Impact Behaviour of Thick GFRP Pultruded Laminates", *Construction and Building Materials*, Vol. 279, Pp.122491, (2021).
8. Seifoori, S., Parrany, A. M., and Mirzarahmani, S., "Impact Damage Detection in CFRP and GFRP Curved Composite Laminates Subjected to Low-Velocity Impacts", *Composite Structures*, Vol. 261, Pp.113278, (2021).
9. Azhdari, S., Fakhreddini-Najafabadi S., and Taheri-Behrooz, F., "An Experimental and Numerical Investigation on Low Velocity Impact Response of GLAREs", *Composite Structures,* Vol. 271, Pp. 114-123, (2021).
10. Megeri, S., and Naik, G. N., "Numerical Studies of the Low Velocity Impact Behaviour on Hybrid Fiber Metal Laminates", *Materials Today: Proceedings,* Vol. 44, Pp. 1860-1864, (2021).
11. Hosseini, S. H., Shariyat, M., and Ghajar, R., "Numerical Simulation of Low-Velocity Impact of Rectangular Composite Plates with Embedded SMA Strips", Considering the Instantaneous Local Phase Changes, *Journal of Energetic Materials,* Vol. 10, Pp. 53 (2015).

Numerical and Experimental Investigation of Deflection of Laminated Composites due to Drop Weight Impact of Different Projectiles

Mohammad Javad Ramezani[1]
Meisam Mohahmmadi[2]

1. Introduction

In many industrialized and developed countries, the role of composites in the development is undeniable. Some of the advantages of composites are high strength to weight ratio, lightweight, good abrasion resistance, and desirable properties. Among the disadvantages of composites compared to metals are low resistance to heat, high cost and weakness against impact loads, which leads to high deformation and damage between the composite layers.

Drop weight test is a method to investigate the damage of structures and mechanical components subjected to impact, although in low-energy impacts, the effects of impact are not usually visible. During the impact, delamination and damages such as fracture of layers and fibers may occur. Hence, investigating behavior of multi-layered composites due to the impact loading is inevitable.

This study investigates numerically and experimentally the effect of dropping different projectiles on the deflection and behavior of multi-layered composites. Two types of woven reinforcements consist of glass and carbon are considered.

2. Experimental method

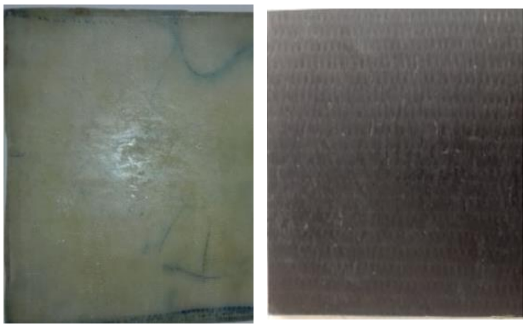
Preparing samples

In order to prepare samples, resin 3001 was used which is mixed with hardener in a ratio of 3 to 1. Different multi-layered laminates, consisted of six layers reinforced with glass and carbon woven fibers are made by prepared resin and subjected to controlled pressure in a press machine for 48 hours to remove excess resins and eliminate the existing bubbles and voids between the layers. Figure 1 shows final samples reinforced with glass and carbon fibers.

Low velocity impact test

The low-velocity impact test was performed by the drop weight test machine shown in Figure 2, in the composite laboratory of Vali-e-Asr University of Rafsanjan. The device is equipped with sensitive and precious sensors to measure the displacement and deflection of samples.

The displacement sensor in Figure 3 is capable of storing 800 data when the plate sample is impacted on the center point.



a) Glass fiber **b) Carbon fibers**

Figure 1. Composite samples

The center point displacement indicates the maximum deflection of laminates in symmetric boundary conditions. This machine has a fixture with clamped boundary conditions on all edges for different composite laminates.

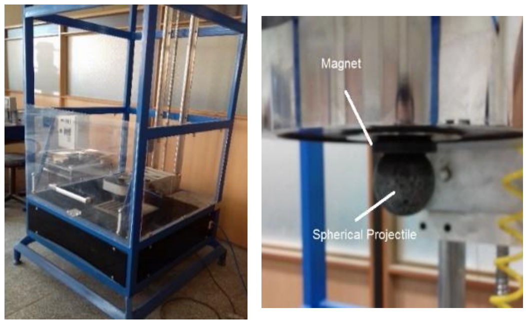


Figure 2. Drop weight device

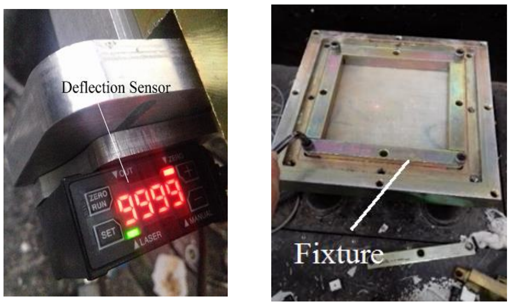


Figure 3. Deflection sensor and fixture

[1] M.Sc. in Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran
[2] Corresponding author. Assistant Professor in Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran. Email: meisam.mohammadi@vru.ac.ir

According to Figure 3, a deflection sensor is used to measure the dynamic response of the composite plate.

The projectiles are dropped from two heights of 1 and 1.5 m with impacts energies of 6.7 J and 10 J. Two types of projectiles, consisted of spherical and semi-spherical geometries, are used and dropped by an electric magnet.

3. Numerical simulation

For numerical study, a 250 × 250 mm square laminate is modeled. 1.9 mm and 3.8 mm for thickness are assumed for glass/epoxy and carbon/epoxy laminates, respectively with $[0/90/0]^s$ lay-up.

ANSYS software is used to analysis the behavior of composite plates subjected to low velocity impact of different projectiles with clamped boundary conditions.

It is worth mentioning that in modelling the surface-to-surface contact, the values of tensile and shear strength between the bonding layers are $\tau_{\upsilon} = 20MPa$ and $\sigma_n = 9MPa$ for glass reinforced composite, and $\sigma_n = 30MPa$ and $\tau_{\upsilon} = 100MPa$ for carbon reinforced composite, respectively.

4. Conclusion

In this study, the maximum deflection carbon and glass reinforced laminates subjected to low velocity impact of different projectiles were studied. Numerical simulation and experimental analysis were done.

In Figure 4 and 5, the variation of maximum deflection of glass and carbon reinforced laminates versus time is depicted. Based on the figures, it is clear that experimental results coincide with numerical results for various cases.

Figure 6 shows damages due to the drop weight of spherical and semi-spherical projectiles occurred in the samples.

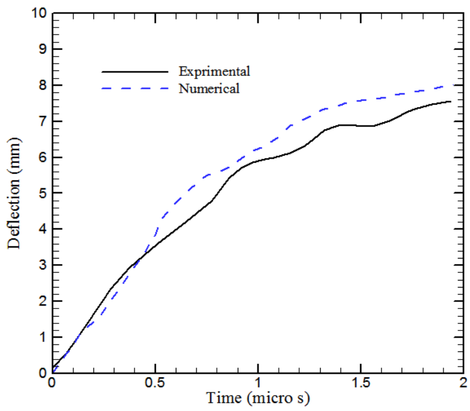


Figure 4. Maximum deflection of glass/epoxy composite subjected to spherical projectile impact

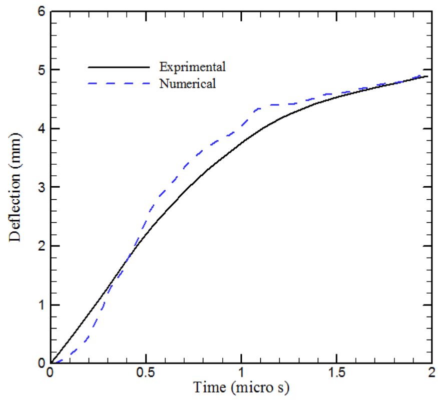


Figure 5. Maximum deflection of carbon/epoxy composite subjected to spherical projectile impact

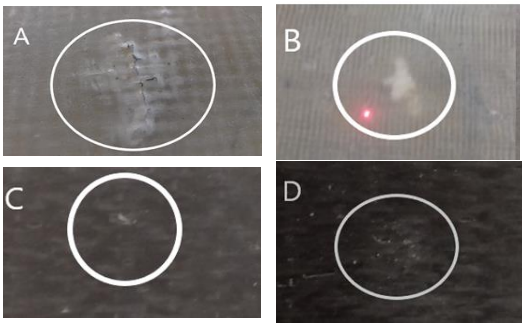


Figure 6. Damages of glass (A and B) and carbon (C and D) reinforced composites subjected to spherical (A and C) and semi-spherical (B and D) projectiles form height of 1.5 m.

The following conclusions are made based on the results:

1. The results showed that carbon fiber reinforced composite specimens has higher strength and impact resistance than glass fiber reinforced composite;
2. Investigation of maximum deflection in carbon reinforced samples shows that stiffness of these samples is more that glass reinforced samples. So that, the maximum deflection reduces about 25% for projectiles drop from height of 1.5 m.
3. The maximum deflection in empirical tests for carbon fiber reinforced laminates at heights of 1 and 1.5 m in the hemispherical projectile decreases by 17.5% and 24.7%, respectively, in comparison with the spherical projectile;
4. The rate of delamination and damage in glass/epoxy samples is more obvious in comparison with the carbon/epoxy samples.